

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Bakalářská práce

2016

Jan Mikoláš

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Institut dopravy

**NÁVRH CVIČENÍ K PŘÍPRAVĚ A VÝROBĚ POZITIVNÍ FORMY
V KOMPOZITNÍ LABORATOŘI**

**PRACTICE PROPOSAL FOR PRAPARATION AND
PRODUCTION OF POSITIVE MOLD IN COMPOSITE LAB**

Student:

Jan Mikoláš

Vedoucí Bakalářské práce:

Ing. Rostislav Horecký Ph. D

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Mikoláš**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R038 Technologie údržby letecké techniky

Téma: **Návrh cvičení k přípravě a výrobě pozitivní formy v kompozitní laboratoři**
Practice Proposal for Preparation and Production of Positive Mold in Composite Lab

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Stručně charakterizujte vývoj kompozitních materiálů.
Zpracujte popis výroby modelu, materiál a jeho tvarování včetně konečných úprav.
Navrhněte technologický postup a vyrobte ve školní laboratoři.
Vypracujte kalkulaci ceny pro Váš výrobek dle katalogu firmy Havel Composites.
Proveďte závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

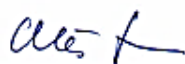
Internetové stránky HAVEL Composites,
Ehrenstein, Gottfried W. polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016

Jan Mikoláš

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem, byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1988 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5. 2016

Jan Mikoláš

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jan Mikoláš

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dobrá 830, 739 51

Poděkování

Za vynaloženou práci bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu **Ing. Rostislavu Horeckému**, za jeho vstřícný přístup, odbornou kritiku, a připomínky při řešení této bakalářské práce. Za poskytnutí školní laboratoře k výrobě modelu, a samotnou manuální pomoc při výrobě.

V neposlední řadě bych taktéž poděkoval své rodině a svým blízkým, kteří za mnou stáli po celou dobu studia na vysoké škole.

Jan Mikoláš

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MIKOLÁŠ, J. *Návrh cvičení k přípravě a výrobě pozitivní formy v kompozitní laboratoři: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2016, 52s. Vedoucí práce: Ing. Horecký R. Ph.D

Cílem bakalářské práce je navržení vhodného pracovního postupu pro cvičnou zkoušku výroby modelu, způsobem kladení tkaniny na pozitivní formu. V první části bakalářské práce se věnuji seznámení s kompozitními materiály, rozdělením, a technologií výroby. Hlavní téma poté navazuje na teoretické znalosti a popisuje podrobnou výrobu modelu vytvořeného ve školní laboratoři. Zhodnocení následně probíhá jak po finanční stránce, tak systémem objektivního vyjádření k dané problematice. Hotový model křídla je součástí bakalářské práce, sloužící pro názornou ukázkou právě takto ručně vyrobeného kompozitu.

Klíčová slova

kompozit, kladení, materiál, technologie, postup

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MIKOLÁŠ, J. *Practice Proposal for Preparation and Production of Positive Mold in Composite Lab: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Departure, 2016, 52p. Thesis head: Ing. Horecký R. Ph.D

The aim of the thesis is proposing an appropriate workflow for the production of a training test model, a way of asking for a positive form of fabrics. In the first part of the thesis I am devoted to familiarization with composite materials, the distribution, and production technology. The main theme then follows the theoretical knowledge and describes a detailed production model created in the school laboratory. Evaluation then takes place both from a financial and a system of objective observations on the matter. The finished model of the wing is part of the thesis, used for demonstration purposes just like this handmade composite.

Keywords

composite, application, materials, technology, process

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
ÚVOD	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
2 HISTORIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	13
3 CHARAKTERISTIKY KOMPOZITŮ.....	14
3.1 Definice výrazu	14
3.2 Rozdělení kompozitů.....	14
3.3 Matrice kompozitů	15
3.3.1 Matrice kovového kompozitu	15
3.3.2 Matrice polymerního kompozitu.....	16
3.3.3 Matrice keramického kompozitu.....	17
3.4 Výztuže kompozitů.....	17
3.4.1 Částice	18
3.4.2 Vlákna	18
4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	19
4.1 Ruční kladení.....	19
4.1.1 Při běžných teplotách	19
4.1.2 Vakuové prosycování.....	20
4.1.3 Ruční kladení prepregů s vytvrzením v autoklávu.....	20
4.2 Mikrovlnný ohřev	23
4.3 Strojní kladení prepregů	23
4.3.1 Navíjení	23
4.3.2 Pultruze	24
4.3.3 RTM – Metoda lisování se vstřikem matrice.....	24
5 POSTUP PŘI VÝROBĚ MODELU	25
5.1 Stanovení profilu	25
5.2 Výroba šablony.....	28

5.3	Odporové řezání	29
5.4	Sestavení, vyztužení, výroba bočnic	32
5.5	Broušení.....	34
5.6	Laminování.....	35
5.6.1	Příprava	35
5.6.2	Množství potřebné pryskyřice.....	38
5.6.3	Potřebné pomůcky.....	40
5.6.4	Proces laminace.....	40
5.6.5	Úprava křídla po laminaci.....	42
6	SOUČET VÝSLEDNÉ CENY PRO VÝROBU	43
6.1	Rozpis komponentů.....	43
6.2	Součet	45
7	ZHODNOCENÍ PRÁCE.....	46
8	ZÁVĚR	47
	Seznam použité literatury.....	48
	Seznam příloh.....	50

Seznam použitých značek a symbolů

Zkratka	Český výraz (Anglický výraz)
PET	Polyethylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
PA	Polyamid
UP-R	Nenasycená polyesterová pryskyřice
VE-R	Vinylesterová pryskyřice
PFA-R	Fenakrylátová pryskyřice
PI	Polyimid
RTM	Metoda injekčního vstřikování (Resin transfer molding)
NACA	Federální úřad leteckého výzkumu (National Advisory Committee for Aeronautics)
CNC	Systém počítačového řízení (Computer Numeric Control)
XPS	Extrudovaný polystyren

Pozn.: V seznamu nejsou uvedeny symboly a zkratky všeobecně známé nebo používané jen ojediněle s vysvětlením v textu.

ÚVOD

Rostoucí trend v letectví a zlepšování aerodynamických vlastností u jednotlivých druhů letadel, vede cesty mnoha firem, ke zkoumání a zařazování nových druhů materiálu do výroby. Do uvedených progresivních materiálů patří kompozitní materiály. Ty v současné době prochází stádiem dynamického vývoje. Jejich uplatnění se najde prakticky v jakékoli oblasti různých průmyslových odvětví. S rozvojem však také rostou nároky na jejich zpracování a výsledné použití. V první části bakalářské práce se věnuji rozdělení kompozitů, jejich historií a způsobem zpracování, kdy teoretické poznatky získané při zpracování kompozitních materiálů, vedou k rozvoji nových metod a technologií zpracování, které se následně uplatnily v praxi. Některé z často používaných technologií jsou popsány v úvodní části mé závěrečné práce. Dále následuje hlavní část, podrobný popis přípravy a postup výroby křídla, který může sloužit jako návod ke cvičení. Díky krokovanému návodu si práci mohou vyzkoušet i další studenti. Návod na cvičení je zpracován za účelem získání teoretických i praktických znalostí studentů o použité technologii zpracování. Komplexní zpracování zajišťuje, aby studenti i pedagog získali přehled o potřebě výrobních pomůcek pro danou technologii, množství materiálu, časové náročnosti a orientační kalkulaci ceny hotového výrobku. Cílem uvedeného návodu na praktické cvičení studentů, je názorně ukázat a prakticky vyzkoušet práci s kompozitními materiály.

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Spojením více materiálů do jednoho konečného celku lze výhodně spojit kladných vlastností materiálu, a potlačit tak jejich zápory. Lidstvo čerpalo mnoho poznatků z přírody, kde je obdoba kompozitních materiálů například u živých organismů.

Typický příklad můžeme najít na struktuře dřeva, technologii včelích pláství, stavba kostí. V praxi se vyskytuje velký počet právě těchto materiálů pracujících na jednom a tom samém principu, většinou se vychází ze dvou materiálů s odlišnými vlastnostmi, které nám ve výsledku dávají nejlepší kombinaci obou složek. Pro příklad to jsou dnes již běžně používané výrobky jako lyže, tenisové rakety, kryty motocyklů, a pak samozřejmě obrovské uplatnění v letectví díky nízké měrné hmotnosti.

Výhody kompozitních materiálu jsou zřejmé, a to především měrná pevnost a modul pružnosti, houževnatosti, a odolnost proti časové únavě. Díky níž mohou výrazně prodloužit životnost takto vyrobené konstrukce. Mají také nižší nároky na údržbu.

Díky absenci korodujících složek disponují výbornou odolností proti korozi. Jelikož jsou konstruovány ve smyslu prostorové mřížky, zajišťují pomalejší postup průniku poruchy. Příznivěji odolávají vibracím, dosahují nízké teplotní dilatace, a možno zmírňují i rázovou pevnost.

Hlavním důvodem používání kompozitů nejsou pouze materiálové charakteristiky komponentů použitých při výrobě. Na rozdíl od klasických kovových konstrukcí disponují odlišnou filozofií výroby a následnými úspory v samotné výrobě. Realizuje se tak minimalizace počtu vyráběných dílů, které se obvykle produkují ve větších celcích, díky tomu může klesnout pracnost výroby některých složitých leteckých celků.

Při kladení materiálu na sebe lze pozvolna a plynule měnit tloušťku materiálové vrstvy, čímž se dosáhne zpevnění pouze v určitém namáhaném místě. Toho by šlo při klasickém obrábění jen těžko dosáhnout, leda způsobem nákladného chemického obrábění. Složitější tvary povrchů s více než jednou rovinou křivosti jsou díky tomu přijatelně líp vyrobitelné s podstatně kvalitnějším povrchem. Rozebírané technologické vlastnosti bývají klíčové při volbě použití kompozitů, než jejich pouhé materiálové charakteristiky.

Kompozitní materiály bohužel jako všechno mají i své nedostatky, zejména při filosofii konstrukce. Dodatečná záměna jednotlivých dílů z konstrukce kovové na kompozitovou není obvykle vhodná. Výsledné vlastnosti kompozitů jsou velice striktní na dodržení technologického postupu při procesu výroby. Zejména orientace vláken,

poměry matrice a výztuže, manipulace s prepregy (předimpregnovaná vlákna), proces vytvrzování a dalších mnoho faktorů. Proto je vždy nutná pečlivější kontrola než u kovových materiálů.

Konečné materiálové vlastnosti ovlivňuje i teplota a vnější prostředí jako je vlhkost, radiace, apod. Z čehož vyplývá náročnější způsob pevnostních zkoušek. [3]

2 HISTORIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Skladba kompozitních materiálů vznikly tak, že lidé začali pozorovat kompozitní struktury vyskytující se volně v přírodě. Tyto struktury jsou totiž viditelné u organických materiálů, které jsou vystaveny velmi vysokému namáhání a zatěžování, například dřevo, tkáň, ulity, atd.

Zárodky kompozitních materiálů lze spatřit, už před naším letopočtem, kdy se používaly hliněné cihly, které za účelem zpevnění byly vyplněné slámou.

Vědomé používání kompozitů však přišlo mnohem později. V období světové války v letech zhruba 1940 - 1950 vznikla idea snížení hmotnosti a zvýšení výkonových parametrů letadel a raket, právě pomocí kompozitů. Později v letech 1950 -1970 byly kompozitní materiály díky studené válce zcela výhradně používány ve strategických odvětvích jako kosmonautika, vojenská technika, letectví. Tato chráněná technologie byla postupně uvolňována v letech 1970 – 1980 i pro ostatní odvětví kde bylo třeba využít potenciál kompozitních materiálů. Hlavně se jednalo o civilní letectví, závodní automobily, a sportovní vybavení.

Pro názornost uvádím několik historických milníků, které přispěly dalšímu vývoji v oblasti kompozitních materiálů.

- 1908 – Baekeland – fenolitická pryskyřice zpevněná dřevěnou moučkou
- 1933 - začátek výroby skleněných vláken v USA u firmy Owens-Illinois Glass
- 1943 - Spitfire – sklolaminátová konstrukce trupu vojenského letounu
- 1957 - první použití uhlíkového vlákna z viskózy v USA
- 1957 - začátky technologie vstřikování pod tlakem do formy [3, 5]

3 CHARAKTERISTIKY KOMPOZITŮ

3.1 Definice výrazu

Pojmem kompozit se rozumí takový materiál složený alespoň ze dvou chemicky a fyzikálně odlišných složek skládajících se z různých fyzikálních vlastností. První část tvoří matrice. Ta slouží k uložení druhé části složky, což jsou většinou vlákna - výztuž. Kompozit přitom dosahuje vlastností, kterých nemůže být dosaženo kteroukoliv složkou zvlášť, a to ani součtem vlastností jednotlivých materiálů.

Tvrdší, tužší a nespojitá složka se nazývá výztuž. Spojitá a obvykle poddajnější složka se nazývá matrice.

Kompozit lze

- Vzniká smícháním jednotlivých složek
- Vlastnosti matrice a výztuže jsou odlišné, výztuž je pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- Podíl výztuže musí být větší než 5%

3.2 Rozdělení kompozitů

Obecně lze složky používané při výrobě rozdělit podle:

Podle materiálu matrice

- kovová (matrici tvoří kov, Al, Mg, Cu, Ti, nebo slitiny, například ocel, bronz, silumin, dural)
- polymerní (polyester, polyetylen, PVC, pryskyřice)
- keramická (pálené cihly, porcelán, keramika)
- skleněná
- uhlíková

Podle druhu výztuže

- kompozity vyztužené částicemi
- kompozit vyztužené vláknem
- vrstvené kompozity

Rozdělení kompozitů je samozřejmě mnohem rozsáhlejší, a dalo by se jít do hloubky problematiky podstatně dál. Práce je však zaměřena zejména na použití kompozitů v letectví a výrobu modelových výrobků v laboratoři kompozitních materiálů.

3.3 Matrice kompozitů

Tímto pojmem se rozumí zvolený materiál, který pak tvoří základní stavební prvek celého kompozitu. Jejím úkolem je svázat výztuhu dohromady prosycením vláken a vytvořit tak kompaktní celek. Musí dokázat držet celek ve správné orientaci, přenášet na něj rovnoměrně zatížení, chránit před okolním prostředím. Odděluje vzájemně jednotlivé výztuže čímž lze zajistit odolnost vůči spojitému šíření trhlin a poškození. Zajišťuje mezi laminární smykovou pevnost kompozitu. Určuje vlastnosti jako je smrštitost při vytvrzování, chemickou odolnost atd. Matrice musí být taktéž dostatečně pružná, neboť při tahovém namáhání by mohlo dojít k její poruše dřív, než k poruše vlákna.

Důležitým faktorem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze (přilnavosti) na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro zajištění lepší fyzikální a chemické vazby mezi vláknem a maticí se nanese na vlákno apretace (úprava povrchu) vhodná pro odpovídající matici. Matrice musí mít optimální viskozitu a povrchové napětí, aby bylo vlákno dokonale smočeno bez vzniku bublin. [1, 3, 2]

3.3.1 Matrice kovového kompozitu

Je velmi často využívána jako kombinace kovové nebo keramické výztuže ve formě vláken nebo částic. Využití najdeme v současnosti zejména v automobilovém průmyslu, a to jako matici kompozitu tvořenou Al-12% Si a dalšími prvky jako Zn, Mg, Si, Fe, atd.

Takto vytvořené kompozity se vyznačují výbornými vlastnostmi především z hlediska tepelné vodivosti, objemové stálosti, koeficientu tepelné roztažnosti a odolnosti proti opotřebení. Dále elektrická vodivost, nehořlavost, možnost povlakování, odolnost ohrusu. Jednotlivých vlastností se dosahuje za pomoci požadovaného typu, tvaru, velikosti, a relativního množství částic nebo vláken požitých při výrobě. Avšak oproti tomu specifické vlastnosti (pevnost, tuhost) jsou za normálních teplot nižší než u polymerních kompozitů. Navíc výrobní náklady jsou mnohem vyšší. V současné době se výroba kovových matic soustřeďuje na tři skupiny, určené pro různé teplotní rozsahy použití.

- hliníkové slitiny pro teploty 300 až 400°C,

- titanové slitiny, teplotní rozsah 500 až 600°C,
- superslitiny na bázi niklu, železa, kobaltu pro nejvyšší teploty až 1150°C.

Nejčastěji se dá s takovými kompozity setkat u pístů spalovacích motorů, kluzných ložisek, brzdových bubnů, atd. [1, 3, 2]

3.3.2 Matrice polymerního kompozitu

Kompozity s polymerní matricí jsou nejpoužívanějším druhem. U polymerních kompozitů se matrice dělí na **termosety** (reaktoplasty) a **termoplasty**. Vysvětlení o použitých polymerních materiálech je uvedena dále.

Termosety

Tyto reaktivní pryskyřice tvoří i dnes většinu kompozitních aplikací. Mají tu schopnost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu.

Viskozita reaktivních licích pryskyřic je ve srovnání s termoplasty podstatně nižší. Proto se termosety zpracovávají snadněji, lépe se smáčejí a prosycují vlákna. I energetické nároky na prosycování jsou nižší, jelikož proces zpracování probíhá při podstatně nižších teplotách.

Termosetické pryskyřice se vytvrzují přidáním katalyzátoru, který při polymerní reakci lze urychlit urychlovačem. Takto vytvořený materiál sice dosahuje vysoké pevnosti a tuhosti, ale bývají často křehké. Zlepšení lze zajistit přidávkou modifikačních přísad. Nejčastěji se používají tzv. reaktivní pryskyřice, mezi nejdůležitější patří:

- nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP-R),
- vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice,
- epoxidové pryskyřice,
- fenolické pryskyřice,
- metakrylátové pryskyřice,
- izokyanátové pryskyřice. [1, 3, 2]

Termoplasty

Termoplastická matrice je v průmyslu využívá méně z důvodu vyšších výrobních nákladů, a omezené použitelnosti. Za normálních podmínek je ve skupenství pevném, a

aby jí bylo možno zpracovávat je třeba zahřátí mnohdy nad 200°C. Výztuž je tvořena obvykle buďto krátkými nebo delšími skelnými vlákny. Po spojení je nutné takto vzniklý kompozit ochladit.

Výhodou termoplastů oproti termosetům je jejich houževnatost. Dále pak, že v průběhu jejich zpracování probíhá pouze roztavení a ztuhnutí, nikoli však chemický proces, který by zapříčinil změnu jakosti výrobku. Jen minimum termoplastových kompozitů však dosahuje obdobných hodnot (meze pružnosti, tepelné odolnosti, odolnosti vůči chemickým vlivům) jako termosety.

Termoplast prosycuje vlákna v roztavené fázi, což je vzhledem k řádově vyšší viskozitě komplikovanější proces než je tomu u termosetických pryskyřic. Je tedy potřeba zařízení, kterým se dá prosycování urychlit za působení vnějších sil. [1, 3, 2]

3.3.3 Matrice keramického kompozitu

Tenhle druh matrice může být vyroben ze skla, keramiky, případně konstrukční keramiky. Matrice jsou velmi křehké, mají nízkou vrubovou houževnatost, a dosahují malého poměrného prodloužení při přetržení, zpravidla menšího než vlákna sama. Díky tuhé a křehké matici dochází jen k velmi malému přenosu zatížení do vláken.

Použitím kovových vláken (W, Ti, Mo) dochází ke zvětšení lomové energie kompozitů s keramickou maticí. Ovšem největší podíl vláken je 50%. Při dalším zvětšování se stává matrice pórovitou. U takto vyrobených matic se využívá jejich tepelné a chemické odolnosti. [1, 3, 2]

3.4 Výztuže kompozitů

Za výztuž je možno považovat takovou složku, díky které se kompozit vytvořil požadované vlastnosti. Dají se dělit podle různých hledisek. Například podle materiálu, tvaru a velikosti, podle použité matrice, atd. Při rozdělení podle tvaru a velikosti se uplatňuje takzvaný štíhlostní poměr, jenž nám definuje podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže

Rozdělení podle tvaru a velikosti:

- Částice – dosahují štíhlostního poměru menšího než 10.
 - Izometrické – mají tvar koule nebo elipsoidu, štíhlostní poměr roven 1
 - Anizometrické - destičkový, nebo jehlicový tvar. Štíhlostní poměr >1

- Vlákná – velikost štíhlostního poměru větší než 10
 - diskontinuální – krátká vlákna, hodnota štíhlostního poměru v řádech desítek až stovek.
 - kontinuální – štíhlostní poměr = ∞

3.4.1 Částice

Mají buď přírodní tvar, nebo se průmyslově upravují mechanickým mletím na požadované tvary a velikosti. Nebo mohou vznikat z přírodních materiálů při chemické změně. Mezi významné minerální výztuže patří kaolin, mastek, slída, skleněné kuličky.

3.4.2 Vlákná

Mají v kompozitu především zajistit mechanické vlastnosti a to pevnost a tuhost. Ta je u kompozitu výrazně větší, než pevnost samotného materiálu v normálním stavu. Příčinou je malý průřez vláken, který u tenkých vláken, snižuje riziko vrozených vad. A taktéž nebezpečí vznikající na povrchu vlákna je při malých rozměrech menší. Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice a musí dosahovat mnohem větší tuhosti. Matrice se nesmí poškodit dříve než vlákna.

Velkou roli hraje také vznik elektrické vodivosti, která se v případě uhlíkových vláken může výrazně projevit právě na jejich použití. Běžně užívanými vlákny jsou skelné, uhlíkové, a aramidová (kevlar). Výztuže ve tvaru vláken mohou být dlouhá a nepřerušovaná, nebo krátká. Vlákná mohou mít uspořádání v jednom směru, v obou směrech, ale v případě speciálních požadavků je lze uspořádat i náhodně. Běžně se setkáváme s následujícími druhy:

- sekané prameny,
- mletá vlákna,
- prameny,
- rovingy,
- jednoduchá příze, kablovaná příze (vzniká zkrucováním pramenů, a jejich sdružováním),
- rohože,
- prepregy. [1, 3, 2, 4]

4 TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

V praxi je používána celá řada technologií od těch nejjednodušších, které lze provést i v domácích podmínkách pomocí štětce, nebo válečku až po specializované technologie při změnách teplot, tlaku, atd.

4.1 Ruční kladení

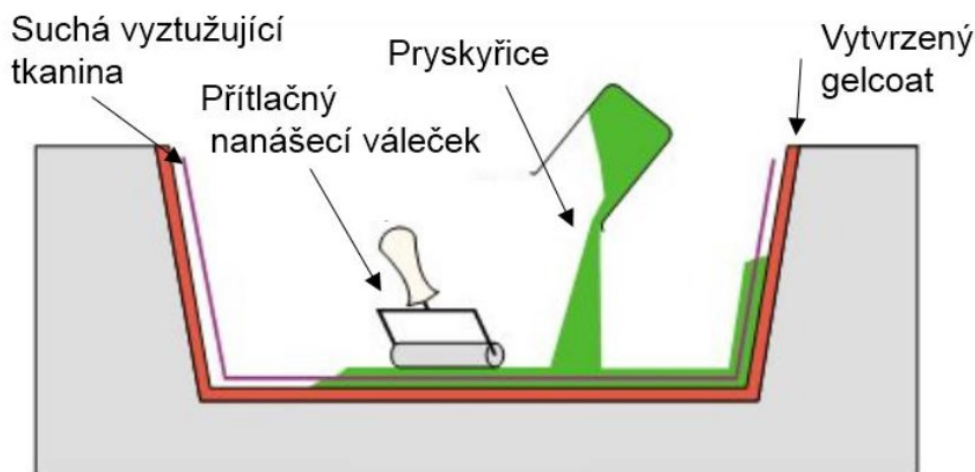
Zde existuje celá řada způsobů, které při technologickém zpracování mohou být použity a jsou vysvětleny v dalších podkapitolách.

4.1.1 Při běžných teplotách

Ručním kladením výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože, pryskyřice při teplotě výroby musí téct. Prosycování výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručně (pomocí štětce, stěrky nebo válečku). Odpařování reaktivního rozpouštědla do ovzduší je možno potlačit použitím pryskyřic s vosky, vytvářejícími na povrchu stojící pryskyřice nepropustnou vrstvu (pryskyřice se sníženou emisí rozpouštědla). Při prosycování výztuže je však účinek vosku zanedbatelný. Vyrobené díly se vytvrzují nejčastěji za studena, tj. při pokojové teplotě, avšak lze je dotvrzovat za zvýšené teploty. Ruční kladení za mokra lze použít pouze tehdy, neklesne-li teplota pod 15°C. Proces vytvrzování závisí, na použitém vytvrzovacím systému. Nejčastěji se používá kladení do negativní formy.

Postup při zpracování:

- Povrchově upravit formu separačním gelem,
- nanést vrstvy pryskyřice,
- položit vyztužující tkaninu,
- nanesení další vrstvy pryskyřice, jež je vtlačena válečkem do struktury,
- vytvrzení na vzduchu. [5, 7, 8]



Obr. 1 Schéma ručního kladení [8] str. 16

4.1.2 Vakuové prosycování

Tato metoda je pouhým vylepšením klasického ručního kladení. Pomocí vakuové infuze je dosaženo odstranění vzduchových bublin, vznikajících na povrchu pryskyřice.

Vrstvy, jež se na sebe kladou, jsou následující:

- odtrhovací vrstva – Chrání povrch před znečištěním a dává povrchu vhodný tvar pro následné lepení a nástřik barvy,
- dírkovaná fólie – umožňuje tok pryskyřice a průchod plynů,
- odsávací vrstva – má za úkol odsát přebytečné množství pryskyřice,
- vakuovací fólie – vytvoří hermeticky uzavřenou kapsu,

Kvalita zpracované plochy závisí na zkušenostech pracovníků. [9, 8]

4.1.3 Ruční kladení prepregů s vytvrzením v autoklávu

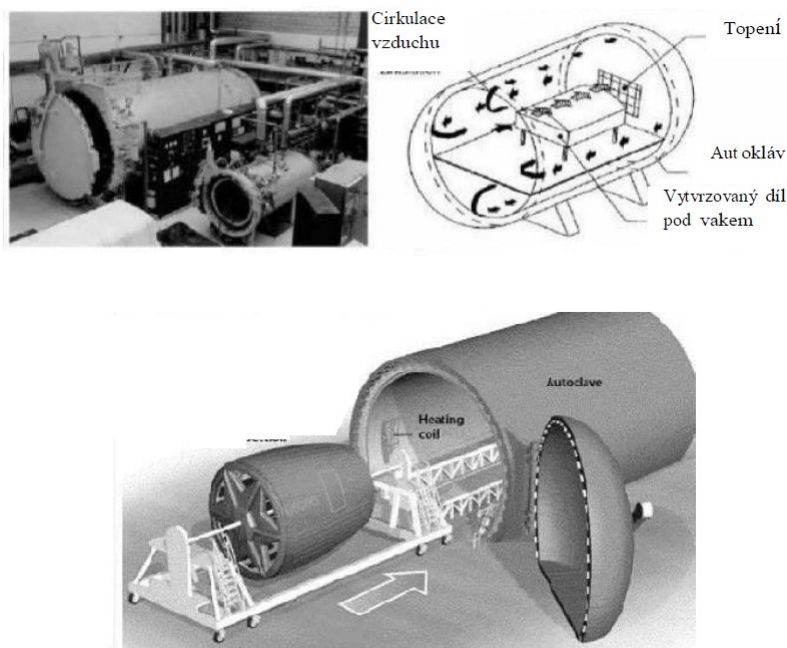
Technologie je vhodná pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Do otevřené formy opatřené vrstvou separátoru, nebo neporézní folií je vložena odtrhová vrstva z tkaniny, z vláken PET, PA nebo ze skla. Tahle vrstva ochraňuje povrch před znečištěním.

Dle požadovaných vlastností je nutné určit skladbu laminátu a připravit přesně orientované nařezané vrstvy prepregů. Aby se dosáhlo lepší přilnavosti prepregů, doporučuje se nahřívat horkým vzduchem. Po položení potřebného počtu vrstev je na vrchní vrstvu dílu položena opět vrstva odtrhová a poté vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy (děrovaná fólie). Na tuto fólii se klade vrstva, která zajišťuje odsátí přebytečné pryskyřice. Obvykle je vyrobena jako rohož z polymerních vláken, snášející teplotu vytvrzování. Stejnou funkci plní i jemná skleněná

rohož, nebo tkanina. Odsávací vrstva je překryta prodyšnou folií, na níž jsou položeny odvětrávací vrstvy z polymerní nebo skelné rohože (nebo tkaniny), umožňující odsátí vzduchu. Vakuovou těsnost prostoru zajišťuje polymerní vakuovací fólie.

V tlakové nádobě, tzv. autoklávu, je provedeno vakuování dílů. Po odsátí vzduchu z vakuové kapsy přitlačuje jednotlivé vrstvy atmosférický tlak. Po ohřátí prostoru uvnitř autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120° až 200°C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah přebytečné pryskyřice ve struktuře vytvrzovaného dílu.

Doba působení teploty a přetlaku se volí podle rychlosti vytvrzování pryskyřice. Chladnutí dílů musí být pomalé, aby mohla vlákna výztuže relaxovat a snížit tak vnitřní pnutí v laminátu, která vznikla rozdílnou tepelnou roztažností složek kompozitu při různé orientaci vrstev. Zvláštní pozornost režimu vytvrzování je zapotřebí věnovat při výrobě tlustostěnných dílů. Při větší tloušťce laminátu může dojít v důsledku exotermické reakce, doprovázející vytvrzování pryskyřice, k přehřátí středních vrstev laminátu a k poklesu jejich mechanických vlastností. [5, 7]



Obr. 2 Vytvrzování strojně kladené části trupu letadla Boeing [5]

Prepregy

Jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů, jejichž hlavní složkou je již předimpregnovaná výztuž vyplněná z části vytvrzenou pryskyřicí. Prepregy se

uchovávají v mrazících boxech při teplotě -20°C , aby nedošlo k jejich předčasnému slepení. Po vytažení z mrazicího boxu se nechají zhruba 24h aklimatizovat. Poté je možno je vrstvit do formy na požadovanou tloušťku. Vytvrzují se působením tepla a tlaku a autoklávu. Vyznačují se velice dobrou zpracovatelností, avšak vyšší cenou. Nevýhodou je odpad, který se obtížně zpracovává s ohledem na předepsané expirační lhůty.

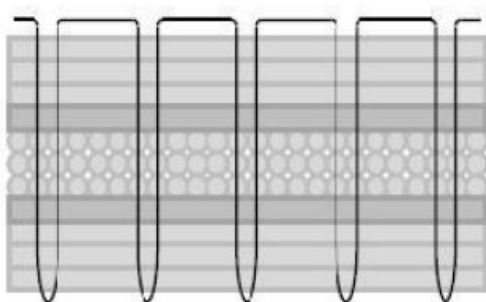
Z prepregů se vyrábí zejména kompozitní díly pro letectví a kosmonautiku, u kterých je předepsaná pevnost a tuhost dílů. Airbus vyžaduje pouze díly vyráběné strojně pomocí prepregů. [7, 5]



Obr. 3 Prepreg připravený na laminaci [7]

Výroba reaktoplastických prepregů

Při výrobě tkaninových prepregů se volí způsob za mokra. To znamená, že tkanina je smočena roztokem pryskyřice. Vícevrstvé prepregy se opatřují proti delaminaci vzájemným spojením vrstev. Prepregy se impregnují epoxidovou nebo fenolickou matricí. Jako výztuž se používá dle potřeby sklo, uhlík nebo kevlar. Jsou uchovávány v podchlazeném stavu. Epoxidové prepregy se využívají pro pevnostní aplikace.



Obr. 4 Kladení vláken prepregů [5]

4.2 Mikrovlnný ohřev

Mikrovlnným ohřevem dosáhneme lepší kontroly teploty při menší spotřebě energie, zhruba o 80% menší spotřeba oproti autoklávu. A zkrátí se i čas potřebný pro vytvrzení, zhruba o polovinu. Zařízení pro mikrovlnný ohřev by mohlo nahradit dražší autoklávy. Kovy se mikrovlnným zářením neohřívají, ba naopak působí jako reflektory. Některé transparentní nekovové materiály se rovněž neohřívají, jako například sklo, skleněná vlákna. Vhodnou kombinací materiálů je možno vytvořit nástroj, v němž se mikrovlnné záření soustřeďuje jenom na ohřev pryskyřice, a nikoli formy. Čímž lze samozřejmě snížit náklady na výrobu. Ostatní materiály však mají rozdílnou schopnost pohlcovat záření, a to je taky důvod, proč nejsou vhodné. Běžně používané vaky, fólie, a odvzdušňovací vrstvy právě záření pohlcují. Jediný vhodný materiál, jenž pohlcuje jen malé množství záření je vak z polyimidu (PI), je i teplotně stabilní.

Technologií mikrovlnného ohřevu se zabývá pro příklad společnost GKN Aerospace, jenž pracuje pro Airbus. Dosavadní výsledky této technologie ukazují, že kvalita je srovnatelná s metodou autokláv. [5]

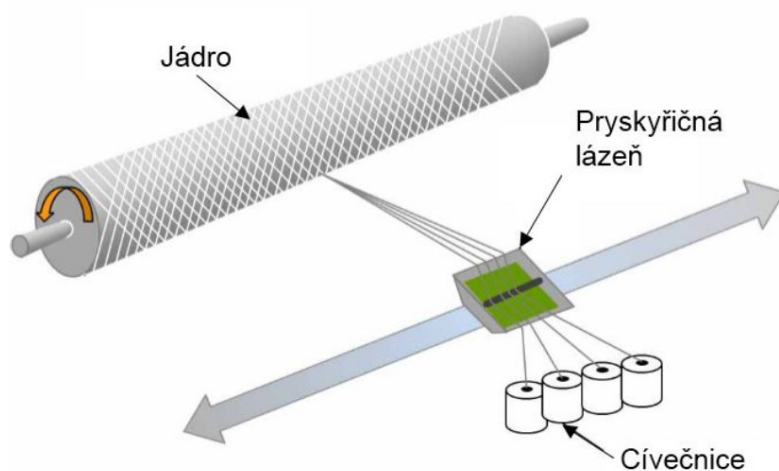
4.3 Strojní kladení prepregů

Při této technologii se využívají kladecí stroje. Počítačem řízené stroje jsou vybaveny kladecí hlavou, jenž se dokáže pohybovat nad formou s dostatečně velkým stupněm volnosti. Tato hlava sejme separační fólii, předejde prepreg, s reaktoplastickou matricí, a pomocí kladky jej přitiskne k dalším vrstvám. Na konci jednoho kladecího cyklu hlava prepreg odřeže. Proces strojního kladení je velice rychlý, oproti ručnímu kladení výrazně časově úspornější a tudíž i levnější. Navíc se zde vyloučí chyba člověka, čili zvolená orientace vláken bude vždy správná.

4.3.1 Navíjení

Technologie je založená na navíjení nepřetržitého pramene uhlíkových vláken již naimpregnovaných pryskyřicí, na otáčející se vřeteno (trubka). Použitím této metody lze přesně uspořádat a orientovat vlákna, čímž se dosáhne přesných požadovaných parametrů. Jádro je upnuto to rotačního zařízení, které se buď stane součástí výrobku, nebo je vyjímatelné. Výztuže jsou navíjeny za předem zvoleného předpětí, orientace, a složení. Takto vzniklý kompozit se poté vytvrzuje v autoklávu, za neustálé rotace. Tento proces může být velmi snadno automatizován. Technologie je využívána pro výrobu

trubek, kolen, a velkých dutých součástí. Ale taky pro výrobu lyžařských hůlek, a rybářských prutů. Nevýhodou je velká pořizovací cena stroje.



Obr. 5 Schéma navíjecího stroje [8] str. 19

4.3.2 Pultruze

Tento výrobní postup je založen na kontinuálním tažení svazků přes pryskyřičnou lázeň, ve které dochází k prosycení vláken. Dále je výztuž tvarována do požadovaného průřezu. Vytvrzení probíhá průběžně ve vytvrzovací hlavě. Je možno použít i mikrovlnný nebo indukční ohřev pryskyřice. Pás pokračuje k řezačce s diamantovým řezným kotoučem, kde je řezán na potřebný rozměr. Poté se nechá ještě vytvrdit na vzduchu. A následně je možno provádět dalších úprav povrchu.

4.3.3 RTM – Metoda lisování se vstřikem matrice

Metoda založená na uzavřené formě. Do dutiny formy je umístěna tkanina a pryskyřice se pod tlakem vstřikuje a vyplňuje formu. Před vyplňováním musí být obě strany dutiny navoskovány. Poté je do dutiny vložena suchá výztuž a může se vstřikovat pryskyřice. Ta po vyplnění dutiny začne vytékat odtokovými otvory ven. Forma je po dobu vytvrzování uzavřena. Po vytvrzení vznikne kompozit, který má z obou stran dokonalý povrch. Nevýhoda této technologie však spočívá v těžkých, kovových formách [5, 8]

5 POSTUP PŘI VÝROBĚ MODELU

Praktická část této práce se zabývá právě přípravou, a následnou výrobou pozitivní formy, tedy modelu křídla. Po prostudování všech možných variant bylo nakonec rozhodnuto, o jaký typ křídla se bude jednat. Zvolená technologie výroby je ideální pro praktické vyzkoušení způsobu laminování uvedeného modelu. Jelikož se jedná o model určený pro výrobu ve školních podmínkách, nebylo možno zajistit veškeré vybavení a profesionální stroje jako tomu je u renomovaných výrobců a firem. Práce bude pojednávat především o ruční výrobě profilu křídla, a samotném laminování za použití epoxidové pryskyřice a skelné tkaniny.

Výsledný model má sloužit jako návod ke cvičení pro další studenty, kteří tak mohou proniknout do problematiky laminování a pochopit jednotlivé fáze výroby, které je třeba dodržet.

5.1 Stanovení profilu

Na začátku všeho je třeba stanovit, o jaký model se bude jednat, nebo pro jaké účely má být použitý. Je to totiž základní požadavek, od něhož se musí odvíjet následující fáze.

Po konzultaci s panem docentem Tichavským, který má značné zkušenosti a výrobou a vývojem letadel, byl zvolen následující profil křídla. Jedná se o profil **NACA 64 A015**. Profil je symetrický, což byl jeden z požadavků pro následné usnadnění výroby formy a případné použití k dalším experimentům.

Profil bylo třeba vypočítat překreslit a vytvořit šablonu tohoto profilu pro odpovídající zadané mezní rozměry. (viz. Tabulka 1)

NACA 64₂A015 BASIC THICKNESS FORM

x (percent c)	y (percent c)	$(y/V)^2$	y/V	$\Delta r_s/V$
0	0	0	0	1.950
.5	1.198	.678	.823	1.852
.75	1.436	.789	.888	1.404
1.25	1.815	.930	.967	1.189
2.5	2.508	1.110	1.054	.912
5.0	3.477	1.228	1.107	.671
7.5	4.202	1.280	1.131	.552
10	4.799	1.314	1.146	.478
15	5.732	1.360	1.166	.384
20	6.428	1.390	1.179	.326
25	6.926	1.413	1.189	.283
30	7.270	1.430	1.196	.249
35	7.483	1.445	1.202	.222
40	7.487	1.458	1.207	.201
45	7.313	1.414	1.189	.177
50	6.978	1.364	1.168	.156
55	6.517	1.311	1.145	.137
60	5.956	1.255	1.120	.121
65	5.311	1.198	1.095	.106
70	4.600	1.139	1.067	.091
75	3.847	1.079	1.039	.078
80	3.094	1.020	1.010	.066
85	2.321	.961	.980	.053
90	1.558	.901	.949	.041
95	.795	.813	.918	.027
100	.032	0	0	0

L. E. radius: 1.561 percent c
T. E. radius: 0.037 percent c

Tabulka 1. Hodnoty pro výpočet rozměru profilu. [6] str. 6

Při zhotovení šablony jsme vycházeli z tabulkových hodnot, které byly použity při výrobě modelu křídla.

- hloubka profilu $c = 312\text{mm}$
- rozpětí křídla $l = 2500\text{mm}$

Hodnoty vypočítané:

- poloměr náběžné hrany r (L. E. Radius)
- poloměr náběžné hrany $r = 1,561\%$ z c

$$r = c \cdot 0,01 \cdot 1,561$$

$$r = 312 \cdot 0,01 \cdot 1,561$$

$$r = 4,87\text{mm}$$

- poloměr odtokové hrany r (T. E. Radius), zanedbatelný rozměr, který není možno dodržet při dané velikosti křídla. Proto se v tomto případě s poloměrem odtokové hrany nepočítá.

Stanovení tvaru profilu:

Profil byl vykreslen pomocí programu AutoCad. Je však možno použít i milimetrový papír spolu s rýsovacími pomůckami.

Pomocí tabulky 1 a dopočítaných hodnot se vykreslí profil.

Klíčový údajem jsou vzdálenost od náběžné hrany x a velikost dané kružnice d pro tuto vzdálenost.

Příklad výpočtu pomocné kružnice pro vzdálenost **20%** od náběžné hrany.

x vzdálenost od náběžné hrany pro 20% c

$$x = 0,2 \cdot c$$

$$x = 0,2 \cdot 312$$

$$x = 62,4 \text{ mm}$$

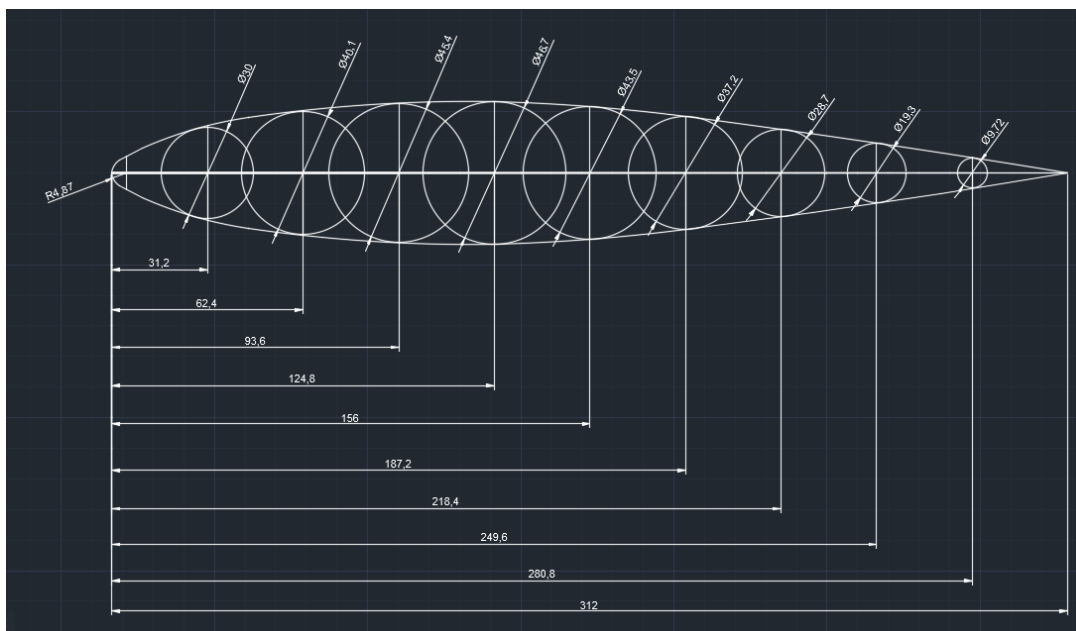
d_2 Velikost kružnice, pro vzdálenost od náběžné hrany 20% z c .

$$d_2 = y \cdot 0,01 \cdot c \cdot 2$$

$$d_2 = 6,428 \cdot 0,01 \cdot 312 \cdot 2$$

$$d_2 = 40,1 \text{ mm}$$

Tímto způsobem se dopočítaly všechny tabulkové hodnoty našeho profilu. Jak je možno vidět na obr. 6

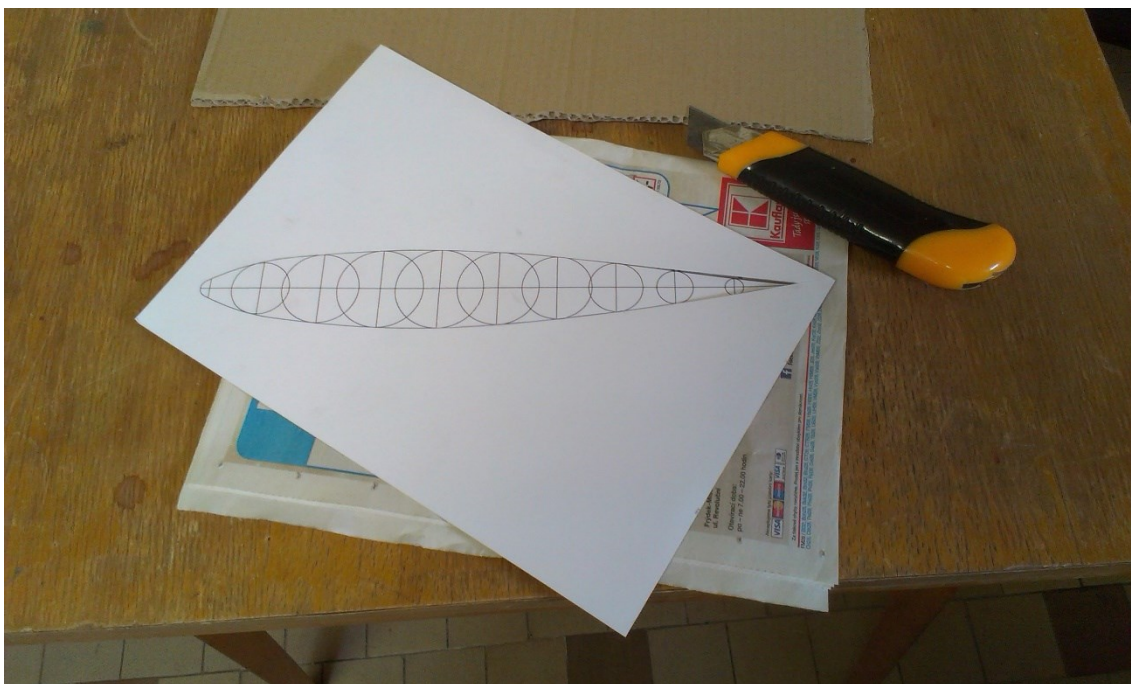


Obr. 6 Prostředí programu Auto CAD 2016, vykreslený profil křídla

5.2 Výroba šablony

Po úspěšném získání profilu bylo třeba přenést tvar na materiál, z něhož bude vyhotovena šablona. Lze použít různé druhy šablon a to jak dřevěné, tak kovové. Riziko u dřevěných je to, že při kopírování tvaru žebra odporovou pilou hrozí spálení šablony zapříčiněné vysokou teplotou drátu. Nejlépe se tedy jevila varianta s použitím duralového plechu.

Přenést tvar šablony (žebra) na plech a následně vyříznout je možno provést různými způsoby. Jednou z možností je použití CNC frézky a žebro vyfrézovat. Tímto způsobem by bylo bez debat dosaženo velmi dobré kvality obrobené plochy. Avšak tato možnost nebyla ve školní laboratoři uskutečnitelná. Následovala tedy metoda tisku žebra na papír v měřítku 1:1 (viz. Obr. 7) a obkreslení tvaru na plech. Na výrobu kovové šablony byl použit duralový modelářský plech 3 x 50 x 1000 mm. Hrubé řezání bylo provedeno kotoučovou pilou. Po vyříznutí hrubého tvaru následovalo ojhlení hran a přesné dobroušení na rozměr jemným pilníkem (obrázek 8).



Obr. 7 Vytisknutý profil křídla na hrubý výkres



Obr. 8 Duralové šablony pro vedení odporové pily

5.3 Odporové řezání

Po zhotovení duralové šablony bylo možné nyní přejít k vyřezání formy z extrudovaného polystyrénu s obchodním názvem (XPS)

Volba XPS byla především podmíněna dobrou schopností pronikání odporového drátu do materiálu, a nepříliš velkým řezným odporem.

Nejprve bylo třeba zajistit dostatečně velkou a výkonnou odporovou pilu (viz. Obr. 9), jež by dokázala dělit materiál po celé délce, bez vzniku chuchvalcovitých částic na povrchu. Vycházelo se z polorozpětí křídla 1250 mm. Pro kvalitní řez musí mít pila na každou stranu rezervu cca 50 mm, aby bylo možno zajistit nepřerušovaný posuv.



Obr. 9 Odporová pila s maximální řeznou délkou 1350 mm

Dalším hlediskem je průměr odporového drátu. Jelikož má pila řeznou délku 1350 mm, je za potřebí, s ohledem na dosažení potřebného napnutí, použít drát o průměru alespoň 0,6 mm, aby nedocházelo k nechtěnému průhybu drátu uprostřed. To by znamenalo, nestejnou tloušťku profilu. Proto byl zvolen drát o větším průřezu, který je možno i patřičně napnout. Nakonec byl pro řezání zvolen odporový drát o tloušťce 0,8 mm.

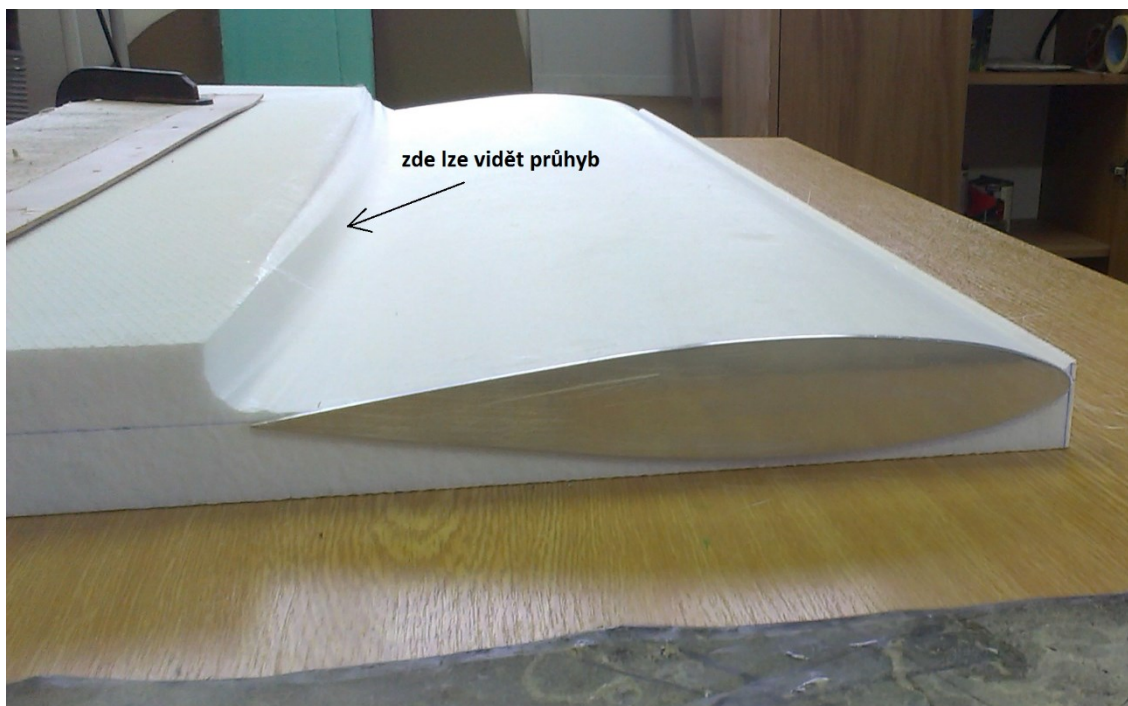
Informace o odporovém drátu:

- Tloušťka drátu: 0.8 mm
- Maximální teplota: 1350°C
- Bod tání drátu: 1500°C
- Složení: 22 % Cr, 5.8 % Al, 72.2 % Fe
- Hustota 7.10 g/cm³
- Zvýšená mechanická odolnost
- Odpor (při 20°C): 1.45 ohm/mm²/m

- Odpor (při 20°C): 2.818 ohm/m (tolerance cca. 0.5%)

Pro řezání je však nutno mít dost výkonný stejnosměrný zdroj napětí odpovídající alespoň 24V 8A, nejlépe s plynulou regulací napětí, což jsme při práci neměli, avšak výsledek nebyl nijak ovlivněn.

V praxi se využívají obvykle pily zabudované na pevné kostře, která je součástí pracovního stolu. Posuv je zde prováděn elektromotory a dosahuje se tak velmi vysoké kvality povrchu právě díky nepřerušovanému řezu konstantní rychlostí.



Obr. 10 Provedený odporový řez – následný průhyb.

V našem případě vznikl největší problém při tažení pily materiálem (řezáním), a následném průhybu drátu. Ten je zapříčiněn tepelnou roztažností drátu. Po prvním zkušebním vzorku, který byl rovněž vyříznut z XPS, jsme zjistili, že křídlo není vyříznuto přesně. (viz. Obr. 10) Při výjezdu drátu z materiálu bylo vidět jistý a dost velký průhyb, právě díky délkové dilataci, a přílišné napnutí drátu zvyšuje riziko jeho přetržení. Tato situace se však dala předpokládat a bylo třeba tomu zabránit. Nakonec byla pro napnutí odporového drátu použita ventilová pružina, která se ukázala, jako nejlepší řešení.

Dalším opatřením, které bylo až později použito, jsou náběhy na odtokové a náběžné hraně. Díky nimž lze snáze do materiálu vniknout (princip vodítka), a taktéž se zabráni právě nechtěnému průhybu. Vodítka mohou být buďto ocelové dráty, nebo v našem případě dřevěné špejle.

Rekapitulace pro samotné řezání:

- stanovit profil
- vyhotovit žebro (nejlépe kovové)
- vyměřit a nalepit žebro na XPS desku s použitím tavné pistole
- nalepit vodítka (drát, dřevěná špejle)

Práci je třeba provádět ve dvou lidech, tak aby byla zajištěna oboustranná kontrola řezu a zajistit, že drát bude kopírovat přesně tvar šablony (profilu). Jinak by mohlo nastat, že jedna strana bude v pořádku, a druhá bude díky nesprávnému přitlaku vroubkovaná. To se samozřejmě projeví na celém povrchu. A pak je nutno pracně povrch opracovávat, brousit, a vyhladit. Což není z časového důvodu ekonomické.

Při práci se nesmí spěchat, a je potřeba klidného nepřerušovaného tahu nástroje materiálem. Jelikož práci provádí dva lidé, je důležitá komunikace mezi nimi. Zejména při výjezdu drátu. Kdy je třeba říct, ano, teď se bude tahat nahoru, a oba současně změni směr tahu.

Po vyříznutí první poloviny křídla nám vznikl odřezek. Ten je nutno bezprostředně po vyřezání odstranit, neboť může nastat, že se znova přilepí. Odřezek, protikus křídla, ještě není třeba likvidovat, jelikož výhodně poslouží při další práci jako přípravek pro broušení a konečnou úpravu křídla. Taktéž pro řezání druhé poloviny profilu.

Druhou stranu křídla řežeme stejným způsobem, kdy opět dodržujeme správný přitlak drátu, rychlost posuvu a kontinuální řez. Pokud dodržíme podmínky, mělo by se nám podařit získat povedený výřezek. Po skončení řezání drátem přichází čas na ostrý odlamovací nůž. Tím jednoduše oddělíme přečnívající nedokonalosti. Pomocí rovné desky nebo dlouhého pravítka seřízneme odtokovou hranu přesně na velikost žebra. Nyní máme profil křídla připraven k sestavení, slepení a následného broušení.

5.4 Sestavení, vyztužení, výroba bočnic

Křídlo jako takové má sloužit pouze jako model, na němž si lze představit podstatu laminování. Čili není primárním cílem, aby bylo použitelné v praxi na létajícím modelu letadla. Avšak i zde jsme museli řešit spojení obou polovin křídla do jednoho výsledného průběžného křídla. Nabízí se mnoho možností jak toho dosáhnout.

První možnost byla použitím uhlíkového nosníku z obou stran. Nejprve se to zdála být dobrá myšlenka, avšak po konzultaci s odborníkem na tuhle problematiku, panem Pavlem Vítem, majitelem modelářského obchodu, a letitým modelářem, jsme od myšlenky

použití karbonového nosníku, ustoupili. Jednalo se o vysokou cenu, a zejména ne tak dobrými vlastnostmi v krutu. Jeho doporučení směřovalo ke klasickým smrkovým nosníkům 10 x 10 mm o délce 1m, pomocných zadních nosníků 5 x 8 mm stejné délky.

Dále bylo třeba zpevnit odtokovou hranu, jelikož XPS je na odtokové části hodně křehký a slabý. Nejlepší varianta byla použít přímo hotovou odtokovou balsovou lištu 30 x 6 mm, která je již zbroušena do ztracena. Boky křídla (okrajové profily) byly olepeny rovněž balsou, zabrání se tak odštípnutí polystyrenu při manipulaci křídla v dílně, a lépe se provádí laminace.

Lepení však nelze uskutečnit sekundovým lepidlem na bázi kyanoakryláku, ten totiž XPS polystyren rozleptává. Dobrou volbou se stalo lepidlo Pattex Express. Rychleschnoucí disperzní lepidlo na bázi polyvinylacetátu pro lepení dřeva, polystyrenu a dalších složek. I když je sice lepidlo rychleschnoucí, pořád je zde vytvrzení v řádu hodin. Proto je výhodné pro dobré stlačení balsové odtokové lišty k profilu křídla, použít víc nastříhaných kusů papírové lepicí pásky. Ta zajistí dokonalé stlačení rovnoměrně po celé ploše. Přebytné lepidlo stačí utřít mokrým hadříkem. Tímto způsobem nalepíme i balsové bočnice.

Máme přilepeny všechny 4 bočnice, a 2 odtokové lišty (viz. Obr. 11). Nyní je zapotřebí zajistit spojení obou křídel v jedno průběžné. K tomu budou sloužit již zmiňované smrkové nosníky. Vetknutí hlavních nosníků je v 1/3 profilu, a pomocných nosníků ve 2/3 profilu. Do XPS křídla se snadno pomocí trafo páječky vypálí potřebná drážka pro uložení smrkových lišt. Je výhodnější drážku dělat menší, zajistí se tak uložení s přesahem. Drážka se namaže vrstvou disperzního lepidla Pattex a silou se do ní vtlačí nosník. Takto opakujeme i druhou stranu. Opět přilepením papírové pásky podél nosníku se zajistí, že lepidlo nebude mít snahu během schnutí vytéct. Po vytvrzení lepidla a stržení pásky je zajištěn i dobrý povrch, který není třeba příliš upravovat.

Rekapitulace a použitý materiál pro lepení vnitřní konstrukce jádra (pozitivní formy).

- smrková lišta 10 x 10 x 1000 mm - 2ks
- smrková lišta 5 x 8 x 1000 mm – 1ks
- odtoková balsová lišta 30 x 6 x 1000 mm - 3ks
- balsa 2 mm standard na bočnice.



Obr. 11 Lepení balsové odtokové lišty, balsová bočnice

5.5 Broušení

Po odporovém oddělení XPS polystyrenu a následném přilepení nosníků bylo potřeba plochu náležitě vybrousit. Jedná se především o zbytky a malé částčky roztaveného a ztvrdlého polystyrenu, oblasti náběžné a odtokové hrany, které je potřeba dopracovat, ať už ručně nebo strojně na požadovaný tvar. Největší nedostatky a plochy, kde se vytvořily vlny díky nedokonalému napnutí drátu, opracujeme smirkovým papírem zrnitosti 80, na dřevěné podložce nebo brusným hoblíkem. Nedoporučuje se však příliš tlačit na brousek, jelikož by docházelo k vydrolování struktury polystyrenu. V oblasti se smrkovými výztuhami je možno přitlačit víc.

Poslední úpravy povrchu provádíme jemným smirkovým papírem zrnitosti alespoň 180 za pomoci vzduchové vibrační brusky (viz. Obr. 12). Tímto dosáhneme opravdu hladkého povrchu.



Obr. 12 Broušení křídla vibrační vzduchovou bruskou

5.6 Laminování

Po všech předchozích krocích zhotovení profilu křídla je nyní možné přejít k hlavní technologické operaci, kterou je samotné laminování. Tahle kapitola však v sobě nese mnoho různých důležitých kroků, které je třeba dodržet přesně v dané posloupnosti, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Proto byla tato část postupu zpracována do většího počtu podkapitol.

5.6.1 Příprava

Kvalitní proces laminace vyžaduje zejména dobrou přípravu podle posloupnosti daných operací. Je důležité si přesně rozměřit vyráběný profil, a připočítat přídavky. Jelikož, je profil obdélníkového půdorysu práce se z tohoto hlediska usnadňuje. Taktéž souměrný tvar křídla zajistí snazší laminaci. Nejprve je třeba si nachystat všechny potřebné druhy tkanin a fólií.

Rekapitulace potřebného materiálu

- skelná tkanina 163 g/m² – prostřední díl 1,3 x 0,7 m
- skelná tkanina 163 g/m² – hlavní díl přes celou plochu – 2,6 x 0,7 m
- strhávací tkanina – 2 ks – 1,5 x 0,7 m
- děrovaná separační fólie – 2,6 x 0,7 m

- odsávací rohož – 2,6 x 0,7 m
- vakuovací fólie – 3 x 1,1 m

Jelikož po namíchání epoxidové pryskyřice už nebude moc času, je třeba pracovat velmi rychle díky tuhnutí. Proto je potřeba si připravit prostor a podle posloupnosti naskládat na sebe všechny druhy fólií, ze kterých se bude vakuově odsávat vzduch z vaku vzniklého mezi fóliemi, je potřeba si umístit vhodný odsávací kompresor s hadicí opatřený ventilkem.

Do vakuovací fólie se pro daný rozměr vyhotoví díra, do které se následně vloží uzavírací ventilek (viz. Obr. 13). Aby bylo spojení vzduchotěsné, fólie se k ventilkou přilepí oboustrannou gumovou lepicí páskou. Jednoduše se po obvodu ventilkou nanese páska a spoj se vizuálně zkontroluje.

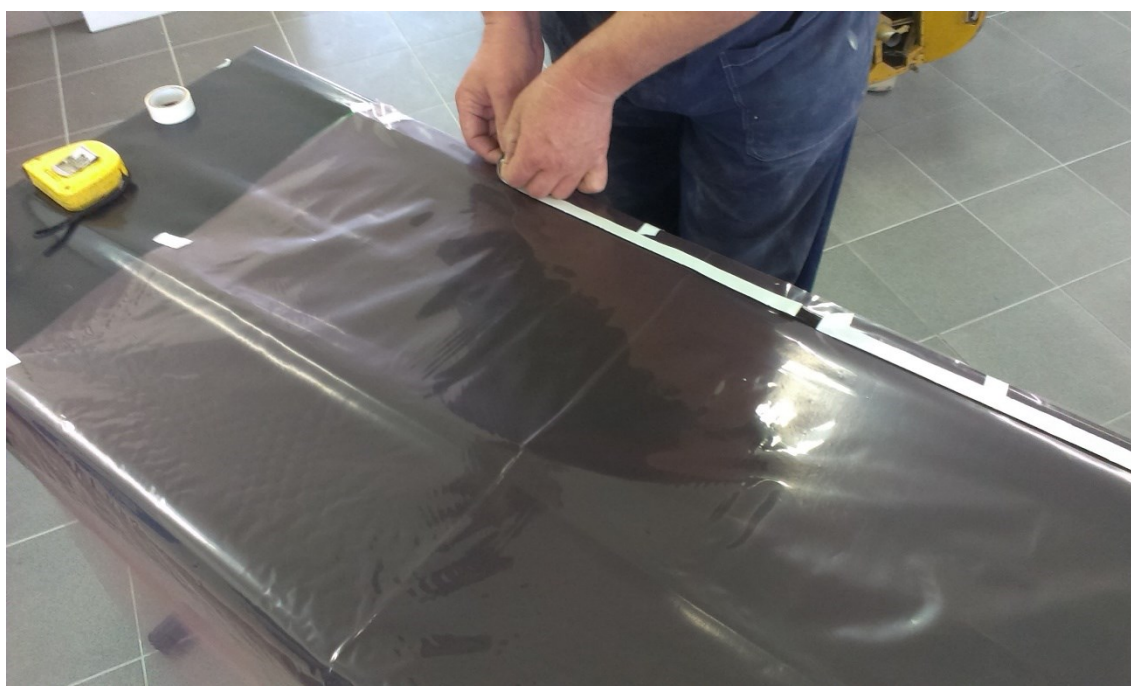


Obr. 13 Umístění ventilkou na vakuovou fólii

Nyní je zapotřebí si nachystat fólie a přesně v daném pořadí je klást na sebe. Začne se tedy vakuovou fólií, která se položí na stůl a pečlivě se zajistí papírovou lepicí páskou ke stolu, aby nedošlo k posunu. Nyní se provede nalepení spodní části gumové oboustranné lepicí pásky – tmelu (viz. Obr. 14), která slouží jako prostředek ke spojení dvou částí vakuové fólie, zajistí nám vzduchovou těsnost a vytvoří se tak jakási kapsa, do které se následně vloží křídlo z XPS, které má být zalaminováno. Neodtrhujeme však zatím bezpečnostní oddělovací pásku (viz. Obr. 15), ta se odhrne až těsně před zahájením vakuové infuze.



Obr. 14 Gumová lepicí oboustranná páska



Obr. 15 Kladení gumové lepicí pásky na vakuovou fólii

Další kladenou vrstvou bude odsávací vrstva. Jedná se o látku se schopností nasát do své struktury přebytečnou pryskyřici, která projde přes odtrhovací a dírkovanou fólii. Je to měkká filcová látka, jejíž struktura připomíná plst'. Opět si nařežeme potřebný rozměr z role, a položíme na vakuovací fólii. Každý další díl, který na sebe budeme klást, si pečlivě přilepíme po okrajích k vakuovací fólii. A to proto, že při položení jádra křídla

budeme muset všechny vrstvy najednou přehodit přes křídlo, a vytvořit tak vzduchotěsnou kapsu. Tím, že budou jednotlivé vrstvy přilepeny k vakuovací fólii, se zabrání nechtěnému překroucení fólií a odsávacích tkanin. Tímto způsobem kladení pokračujeme stejně i při dírkované separační fólii, a rovněž strhávací tkanině. Vždy si každou vrstvu zajistíme lepicí páskou (viz. Obr 16).



Obr. 16 Příprava vrstev pro následné vložení křídla, a vakuové odsátí vzduchu.

Po veškeré nezbytné přípravě pro vakuové odsávání (vakuové infuzi) je možno konečně přejít k samotnému jádru téhle práce. A to právě k procesu laminace. Nejdříve však je třeba popsát, jakým způsobem se bude laminovat. Práce se celou dobu odvíjí od pozitivního způsobu laminace. Podmínky, ve kterých byla práce provedena, jsou metodou ručního kladením, a následnou vakuovou infuzí.

5.6.2 Množství potřebné pryskyřice

Potřebné množství pryskyřice se zvolí výpočtem. Nejprve je třeba spočítat plochu křídla, a počet vrstev na sebe kladených. Podle vypočítaného obsahu plochy se porovná výsledek s doporučením výrobce epoxidové pryskyřice, firmou Havel Composites. Kde najdeme předpokládané množství v g / m^2 . Vždy je výhodnější si namíchat pryskyřici s patričnou hmotnostní rezervou. Jelikož u samotného laminování je jen velmi málo času

k přípravě dalšího množství. A případný nedostatek pryskyřice by způsobil velký problém, zejména s ohledem na dopuštěné chyby vytvrzování.

Rekapitulace potřebného množství epoxidové pryskyřice:

Jednoduše se spočítá plocha S pro obě strany:

$$S = l \cdot c \cdot 2$$

$$S = 2,5 \cdot 0,312 \cdot 2$$

$$S = 1,56 \text{ m}^2$$

Protože však budou vrstvy dvě, je třeba připočíst i plochu S_p prostřední zesilovací vrstvy.

A ta má rozměry:

- hloubka profilu $c = 0,312 \text{ m}$
- délka zesilovací vrstvy $l = 1,3 \text{ m}$

$$S_p = l \cdot c \cdot 2$$

$$S_p = 1,3 \cdot 0,312 \cdot 2$$

$$S_p = 0,811 \text{ m}^2$$

Celková plocha S_{celk}

$$S_{celk} = 1,56 + 0,811$$

$$S_{celk} = 2,371 \text{ m}^2$$

Po hrubém výpočtu množství pryskyřice a tužidla a zejména po předchozích zkušenostech pana Ing. Horeckého s tímhle typem látek bylo zvoleno celkové množství potřebného hotového epoxidu 600g. A to v poměru 461g pryskyřice LH 385, ku 139g tužidla H535. Tento hmotnostní poměr je dán výrobcem. Pro olaminování celého křídla bude stačit zmiňovaných 600g celkového epoxidu.

5.6.3 Potřebné pomůcky

Pro kvalitní provedení práce, je třeba mít dostatečné vybavení dílny. Jedná se o pomůcky a přípravky, bez kterých by se práce odvíjela velmi pomalu. Jako nejdůležitější je použití ostrých nůžek pro stříhání vláken. Sada štětců, ať už malé, či velké. Váleček pro aplikaci pryskyřice mezi vlákna. Kovový váleček pro vytvoření stejnoměrné vrstvy pryskyřice po povrchu křídla. Gumové rukavice, hrubé, na ruční oblepení a vyhlazení výsledného potahu. Dále sadu čistících ubrousků a aceton pro odstranění případných skvrn.

5.6.4 Proces laminace

Je-li připraveno vše potřebné, pryskyřice namíchaná ve vypočteném množství, a na připravených stolech přichyceny na sebe fólie pro vakuové prosycování. Nyní už stačí pouze přichystat si skelnou tkaninu na stůl, poblíž křídla. Naznačit body vymezující vzdálenost od poloviny křídla, tak aby první vrstva textilie procházela středem křídla nepřerušovaně. Čímž se dosáhne předpokládané zvýšení pevnosti. Teď už zbývá vzít molitanový váleček, nabrat vrstvu pryskyřice a rozetřít po celé vyznačené ploše. Takto provést celou stranu křídla. Nyní se může přesně položit tkanina na lepící plochu. Dojde k přichycení tkaniny, a pryskyřice. Je však nutno prosytit vlákna. To se provede další vrstvou pryskyřice, teď už přímo na textílii. Tlačivým pohybem se snažit natřít povrch a co nejvíc prosytit vlákna (viz. Obr. 17). Kde nám zůstane vrstva nevsáknuté pryskyřice, nic se neděje. Ta se později vakuově dostane do odsávací vrstvy. Takto provedeme celou jednu stranu křídla. Je třeba pracovat svižným tempem, jelikož epoxid rychle tuhne. Po prosycení jedné strany křídla se provede rozmazání epoxidu pro straně druhé, a znova stejný postup. Je potřeba obracet tkaninu po náběžné hraně, jinak by vznikl lem na náběžné hraně, což není žádoucí. Tento spoj (lem) je potřeba situovat směrem k odtokové hraně, který se po zaschnutí jednoduše odřízne. Provede se tedy prosycení stejným způsobem i na straně druhé. Následuje položení druhé souvislé vrstvy tkaniny přes celé křídlo. Postupovat se bude obdobným způsobem jako při předchozí vrstvě.



Obr. 17 Roztírání pryskyřice po povrchu křídla

Nejprve pryskyřici rozlít a štětcem roztáhnout po ploše, a poté položit tkaninu. Opět molitanovým válečkem se snažit prosytit vlákna. Vzniklo nám tedy jakési křídlo obalené epoxidovou pryskyřicí a tkaninou, která na koncích přesahuje. Takto vzniklý kompozit už zbývá jenom dopravit do předem přichystaného prostoru, vytvořeného jako kapsa, mezi fóliemi. Opatrně se tedy křídlo podebere a s ohledem, aby nedošlo k odchlípnutí nasáklé tkaniny, se umístí na fólii. Teď následuje přehození všech připravených tkanin a fólií najednou přes křídlo, tak aby nevznikly přehyby. V poslední fázi se odlepí z horní části oboustranné gumové lepicí pásky bílá krycí páska (bezpečnostní oddělovač), a fólie se na těsnící pásky vmáčkne. Vznikne kompaktní vzduchotěsná kapsa. Následuje připojení odsávací trubice vakuové pumpy opatřené ventilkem. Spuštěním vakuové pumpy dojde k odsátí vzduchu z prostoru kapsy (viz. Obr. 18). Na obrázku je dobře vidět, jak se fólie přitlačuje na křídlo, a přebytečná pryskyřice z povrchu křídla se ztrácí v odsávací plstěné vrstvě. Tímto způsobem se výrazně sníží hmotnost výsledného kompozitu, zatímco vlastnosti zůstanou zachovány. Aby se dosáhlo opravdu kvalitního odsátí a vytvrzení pryskyřice, kompresor se nechá v běhu několik hodin.



Obr. 18 Odsávací kapsa – vakuovací fólie

5.6.5 Úprava křídla po laminaci

Po vytáhnutí křídla z odsávací kapsy je třeba postupovat opatrně při manipulaci. Jelikož vytvrzený epoxid spolu se skelnými vlákny je velmi ostrý, a opravdu jednoduše dojde ke zranění. Proto se doporučuje použít pracovní rukavice. Nejjednodušší cesta pro odstranění přečnávajících konců je použití úhlové brusky s tenkým řezným kotoučem. Takovým způsobem řezání je třeba se zbavit jak konců na odtokové hraně, tak přečnávajících konců na obou hranách. Následuje broušení hran nejprve hrubým smirkovým papírem zrnitosti 80, poté jemnější zrnitosti 140 a 250 nakonec. Samotná plocha křídla nevyžaduje příliš mnoho úprav, jen lehké vybroušení pro dokonalý povrch.

Po vybroušení a dosáhnutí velmi jemného povrchu se volí konečná úprava použitím nitrocelulózového laku. Dvě vrstvy stačí na to, aby se povrch leskl. Tímto je výrobek hotov.

6 SOUČET VÝSLEDNÉ CENY PRO VÝROBU

Výslednou cenu je možno zjistit, avšak nebude naprosto jednoznačná. Jelikož na výrobu byly použity prostředky a pomůcky, které jednoduše cenově nelze stanovit. Tyhle jsou však jen zanedbatelnou složkou ve výsledné ceně výrobku. Hlavní části, tvořící základ pro výrobu, stanovit lze. Cena se bude odvíjet, jen z opravdu použitých zakoupených komponentů. Přípravky a nástroje vyrobené pro právě tuhle práci a jejich finanční hodnota, nebude zahrnuta ve výsledném součtu. Jednalo by se zde například o svařovací elektrody pro výrobu odporové pily, a samotný materiál pro vyhotovení pily. Usměrnovací zdroj pro pilu. Dále dílenské vybavení, jako brusné papíry, štětce, čisticí prostředky, ochranné pomůcky. Tyto a mnoho dalších jsou při výrobě potřeba. Finančně se určují špatně, ale každá dílna jimi je vybavená. Proto do celkové kalkulace ceny nejsou uvedeny.

Výsledná cena je součtem následujících komponentů.

6.1 Rozpis komponentů

Tkaniny, fólie

- 1) skelná tkanina AEROGLOSS 163 g/m² – prostřední díl 130 x 70 cm
 - $S_1 = 1,3 \times 0,7 = 0,91m^2$
 - $5m^2 = 184,-$
 - cena po přepočtu: **34,-**
- 2) skelná tkanina AEROGLOSS 163 g/m² – hlavní díl přes celou plochu – 260 x 70 cm
 - $S_2 = 2,6 \times 0,7 = 1,82m^2$
 - $5m^2 = 184,-$
 - cena po přepočtu: **67,-**
- 3) děrovaná separační fólie PP40 červená – 260 x 70 cm
 - $S_3 = 2,6 \times 0,7 = 1,82m^2$
 - $10m^2 = 391,-$
 - cena po přepočtu: **71,-**
- 4) strhávací tkanina s červeným proužkem 83g/m² – 2 ks – 150 x 70 cm
 - $S_4 = 1,5 \times 0,7 \times 2 = 2,1m^2$
 - $5m^2 = 291,-$
 - cena po přepočtu: **123,-**

- 5) odsávací rohož $150\text{g/m}^2 - 260 \times 70 \text{ cm}$
- $S_5 = 2,6 \times 0,7 = 1,82\text{m}^2$
 - $10\text{m}^2 = 380,-$
 - cena po přepočtu: **70,-**
- 6) vakuovací fólie PO 180 růžová – $300 \times 110 \text{ cm}$
- $S_6 = 3 \times 1,1 = 3,3\text{m}^2$
 - $10\text{m}^2 = 414,-$
 - cena po přepočtu: **137,-**

Pryskyřice, tvrdidlo

- 7) epoxidová pryskyřice LH 385 univerzální
- $10\text{kg} = 3174,-$
 - potřebné množství 461g
 - cena: **147,-**
- 8) tvrdidlo H 535
- $3\text{kg} = 967,-$
 - potřebné množství 139g
 - cena: **45,-**

Materiál pro výrobu

- 9) pěnový polystyren XPS $1250 \times 600 \times 60 \text{ mm}$
- cena: **280,-**
- 10) 2ks nosník $10 \times 10 \text{ mm}$, 1ks nosník $5 \times 8 \text{ mm}$
- cena celkem: **36,-**
- 11) 3ks odtoková balsová lišta $30 \times 6 \times 1000 \text{ mm}$
- cena celkem: **222,-**
- 12) 2ks balsa standard $10 \times 1000 \times 3 \text{ mm}$
- cena celkem: **114,-**
 -

Příslušenství

- 13) odporový drát $0,8 \text{ mm}$
- cena za $5\text{m} = 303,-$
 - potřebná délka $1,5\text{m}$
 - cena: **91,-**
- 14) disperzní lepidlo, sekundové lepidlo, bezbarvý nitrocelulózový lak
- odhadní cena: **100,-**

6.2 Součet

Ceny tkanin, fólií, pryskyřice, a tvrdidla jsou uvedeny včetně DPH, a jsou platné dle ceníku firmy Havel Composites, online eshopu [9] ke dni 16. 4. 2016. Ostatní ceny jsou brány podle zaplacených faktur daného zboží od různých dodavatelů.

Součet celkový: 1537,-

7 ZHODNOCENÍ PRÁCE

Výroba pozitivní formy v dnešní době nemá velkého uplatnění. Takový druh laminace se používal na počátku tohoto oboru, kdy nebyla známá metoda negativní formy a tvrzení v autoklávu. Pozitivním způsobem laminace se totiž nedosáhne tak kvalitního povrchu. Forma (kopyto), která se vytvoří je vhodná jenom pro jedno použití, jelikož ji není jakým způsobem vytáhnout. Čili možnost dalšího využití formy je nemyslitelná. Není tedy vhodné pro sériovou výrobu. Použití pozitivního způsobu laminace je možno například v domácím modelaření. Pro výrobu malých motorových krytů, aerodynamických překrytí, popřípadě kabinky. Ale pro využití v praxi a v průmyslu je tato metoda neefektivní.

Použití prepregů a strojního způsobu kladení je v dnešní době tím nejpoužívanějším a žádaným způsobem výroby laminátových dílů. Letecké společnosti odebírající kompozitní díly od subdodavatelů už dokonce ani jiný způsob, než právě strojního kladení prepregů, vakuového odsátí a vytvrzení v autoklávu, neschvalují. Jedině takovýmto způsobem lze dodržet předepsaných vlastností kompozitu.

Kdyby se měla udělat pevnostní zkouška vyhotoveného křídla, hodnoty by mohly dosahovat vysokých čísel. Ale to právě na úkor hmotnosti křídla, která je v porovnání s křídlem konstrukčním, mnohonásobně vyšší. Je tomu tak, jelikož XPS pěnový polystyren je sám o sobě hmotnostně vysoko. Přidáním laminátu na celý povrch, a dřevěných výztuh už se nedá hovořit o křídle, jež by bylo vhodné, pro letuschopný stroj. Úkolem však bylo navrhnout a vyrobit touhle metodou výrobek. Což se podařilo velice dobře.

8 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zaměřovala směrem k výrobě modelu, na němž si lze ukázat právě problematiku kompozitních materiálů. Jednalo se v tomhle případě o model křídla, který však není určen pro reálné použití. Model slouží jako pomůcka a názorná ukázka toho, jakou cestou by mohlo cvičení v kompozitní laboratoři probíhat. V práci je popsán přesný postup výroby, podle něj je možno studentům obohatit praktický výcvik, o právě technologii výroby kompozitních materiálů. Budou mít tak možnost v praxi vyzkoušet jak se laminát chová, jaké jsou jeho klady, ale i nedostatky. V úvodní části práce je seznámení s kompozitními materiály, jejich rozdělení, způsob zpracování. Teoretická příprava pomůže při následovné výrobě modelu. Výsledek této bakalářské práce byl postup výroby pro cvičení v kompozitní laboratoři a seznámení s vlastnostmi kompozitu. Podle této práce mohou studenti sami poznat složitost výroby, a slouží jako pracovní postup.

Seznam použité literatury

- [1] Knižní monografie v českém jazyce: Gottfried W., Ehrenstein: Polymerní kompozitní materiály, v ČR 1. vydání, Praha, nakladatelství SCIENTIA 2009, 351 str., ISBN 978-80-86960-29-6

- [2] Knižní monografie v českém jazyce: Dr. Richard, A. Bareš, DrSc.: Kompozitní materiály, 1. vydání, Praha, nakladatelství SNTL 1988, 328 str.,
Typové číslo L17-B3-IV-31/72231

- [3] Knižní monografie v českém jazyce: Miroslav Mohyla, Petr Mohyla: Strojírenské materiály II., 1. vydání, VŠB-TU Ostrava 2006, 119 str., ISBN 80-248-1019-0

- [4] Ing. Martin Baumruk: Kompozitové materiály v leteckém průmyslu v ČR, ©2016 [online], [cit. 2016-04-02]. Dostupný z [www:](http://www.kompozity.info/clanky/compdb/kompozitove_mat_v_let_prumyslu_CR.pdf)
http://www.kompozity.info/clanky/compdb/kompozitove_mat_v_let_prumyslu_CR.pdf

- [5] Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.: Kompozity, ©2016 [online], [cit. 2016-04-01]. Dostupný z [www:](http://mujweb.cz/zkorinek/) <http://mujweb.cz/zkorinek/>

- [6] Knižní monografie v anglickém jazyce: Theoretical and experimental data for a number of NACA 6A-series airfoil sections, v USA 1. vydání, Springfield, nakladatelství National Advisory Committee for Aeronautics 1948, 28 str., číslo dokumentu: 19930091970

- [7] Firma Form Composite, ©2016 [online], [cit. 2016-04-05]. Dostupný z [www:](http://www.form-composite.com/) <http://www.form-composite.com/>

- [8] Bakalářská práce Petr Bouchal, Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů, VUT Brno 2014
- [9] Firma Havel composites, ©2016 [online], [cit. 2016-03-03]. Dostupný z www: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Návod ke cvičení 1 - výroba pozitivní formy křídla

Příloha 2: Návod ke cvičení 2 – laminování křídla vakuovou infuzí

Návod ke cvičení 1 - výroba pozitivní formy křídla

Rekapitulace použitého materiálu pro lepení vnitřní konstrukce jádra

- smrková lišta 10 x 10 x 1000 mm - 2ks
- smrková lišta 5 x 8 x 1000 mm – 1ks
- odtoková balsa lišta 30 x 6 x 1000 mm – 3ks
- balsa 2 mm standard na bočnice – 1ks
- XPS deska 1250 x 600 x 60 mm
- papírová lepicí páska
- disperzní lepidlo

Pracovní postup pro dílenské zpracování

- účel výrobku
- stanovit, vykreslit navržený profil
- vyhotovit šablony (nejlépe kovové)
- vycentrovat a nalepit šablony na XPS desku s použitím tavné pistole
- nalepit vodítka před a za šablonu (drát, dřevěná špejle)
- upnout XPS desku svěrkami k pracovnímu stolu
- zapnout a nahřát odporovou pilu
- plynulý řez za pomoci 2 osob do poloviny profilu
- otočit profil, znova upnout a pokračovat v řezu
- řez druhé strany profilu stejným způsobem
- začistit, dorovnat povrch broušením
- vyřezat skalpelem nebo trafo pájkou drážky pro nosníky
- nalepit nosníky, odtokové lišty, balsa bočnice disperzním lepidlem
- po přilepení stáhnout papírovou lepicí páskou pro kvalitní vytvrzení
- počkat minimálně 24h pro vytvrzení lepidla
- finálně vybrousit do hladka smrkovým papírem zrnitosti alespoň 180

Návod ke cvičení 2 – laminování křídla vakuovou infuzí

Rekapitulace potřebného materiálu pro laminování

- skelná tkanina 163 g/m² – prostřední díl 1,3 x 0,7 m
- skelná tkanina 163 g/m² – hlavní díl přes celou plochu – 2,6 x 0,7 m
- strhávací tkanina – 2 ks – 1,5 x 0,7 m
- děrovaná separační fólie – 2,6 x 0,7 m
- odsávací rohož – 2,6 x 0,7 m
- vakuovací fólie – 3 x 1,1 m
- pryskyřice, tvrdidlo (poměr 461 g pryskyřice : 139 g tvrdidla)
- gumová lepicí páska
- obyčejná lepicí páska
- nitrocelulózový lak

Pracovní postup pro dílenské zpracování

- nastříhat přesné díly textilie a fólie
- položit jednotlivé vrstvy na sebe v přesném pořadí.
- vytvořit ventilek a utěsnit
- nachystat vakuovou pumpu
- nalepit gumové pásky (neodtrhávat bílou stranu)
- nachystat si tkaniny poblíž stolu
- namíchat požadované množství pryskyřice
- nanést na povrch křídla epoxid a rozetřít štětcem
- opatrně položit první vrstvu tkaniny
- prosytit molitanovým válečkem
- nanést na druhou stranu epoxid a rozetřít
- po náběžné hraně otáčet křídlo, a pokládat druhou polovinu tkaniny
- stejnou operaci provést v závislosti počtu vrstev
- křídlo opatrně podebrat a přenést na místo pro vakuovou infuzi
- strhnout bílé pásky z gumové oboustranné pásky
- přehodit vrstvy přes křídlo
- stlačit ke gumové pásce – vytvoření kapsy
- připojit hadici vakuové pumpy na ventilek
- spustit vakuovou pumpu, a nechat několik hodin v běhu poté vypnout a zavřít ventil
- úplné vytvrdnutí proběhne do 24h
- vytáhnout křídlo z vakuové kapsy
- závěrečně jemně brousit
- nanést buď lak, nebo barvu
- hotový výrobek